

확률론적 기법을 이용한 탄산화 RC 구조물의 내구성 예측

A Long-term Durability Prediction for RC Structures Exposed to Carbonation Using Probabilistic Approach

정 현 준¹⁾*

김 규 선²⁾

Jung, Hyun Jun

Kim, Gyu Seon

Abstract

This paper provides a new approach for durability prediction of reinforced concrete structures exposed to carbonation. In this method, the prediction can be updated successively by a Bayes' theorem when additional data are available. The stochastic properties of model parameters are explicitly taken into account in the model. To simplify the procedure of the model, the probability of the durability limit is determined based on the samples obtained from the Latin Hypercube Sampling(LHS) technique. The new method may be very useful in design of important concrete structures and help to predict the remaining service life of existing concrete structures which have been monitored. For using the new method, in which the prior distribution is developed to represent the uncertainties of the carbonation velocity using data of concrete structures(3700 specimens) in Korea and the likelihood function is used to monitor in-situ data. The posterior distribution is obtained by combining a prior distribution and a likelihood function. Efficiency of the LHS technique for simulation was confirmed through a comparison between the LHS and the Monte Carlo Simulation(MCS) technique.

Keywords : Durability Prediction, Carbonation, Bayes' theorem, LHS Technique, Remaining Service Life

1. 서론

2006년 기상청의 최근에 보고된 자료에 의하면 우리나라의 CO₂농도 분포는 점차 증가하는 추세에 있고 CO₂의 영향으로 콘크리트 구조물의 탄산화가 심화되고 있다. 또한, 2005년 기준 우리나라의 평균 CO₂농도는 379.1ppm으로 다른 나라들과 비교하면 적어도 10ppm 많게 나타나 CO₂의 영향으로 인한 콘크리트 구조물의 열화가 우려되는 상황이다(WMO, 2006; 기상청, 2006). 환경 변화 등 다양한 요인으로 인해 점차 지구의 온난화 현상이 진행됨에 따라 지구의 지표기온이 상승하고, 산성비가 교량에 미치는 영향도 커지고 있다. 특히, 도심에 위치해 있는 콘크리트 구조물의 열화속도가 기타지역보다 빨리 진전되고 있다. 도심지역에 위치해 있는 콘크리트 구조물의 열화현상으로 인한 콘크리트 구조물의 내구성을 확보하거나 예측하는 것은 구조물의 설계 및 유지관리를 위해서 중요한 과제가 되고 있다. 하지만 구조물의 열화 시점을 정확히 예측하는 것은 쉽지 않으며 이는 동일한 교량, 동

일한 예측모델을 이용하더라도 교량의 시멘트 종류, 구조물의 용도, 환경조건, 배합비율, 온도, 수화도, 상대습도 등 여러 변수들에 따라 다른 결과가 생성될 수 있기 때문이다. 현재까지 연구된 탄산화 예측 모델은 초기 탄산화 속도계수에 대해서 일괄적으로 적용되고 있으며, 대상 콘크리트 구조물의 특성 및 상태를 합리적으로 반영하지 못하고 있다.

일반적으로 콘크리트 내 철근의 부식 조건 중에 탄산화의 경우, 구조물의 물리적인 수명은 철근 위치까지 탄산화가 진행되었을 경우 허용한계치에 도달한 것으로 판단하게 된다. 콘크리트 구조물의 열화시점을 미리 예측하여 열화된 구조물을 유지·보수할 수 있어야 대규모의 공사를 미리 방지하고 소규모의 공사를 통한 최소 비용으로 목표하는 구조물의 내구수명을 만족하게 할 수 있다. 따라서 열화된 구조물의 내구성을 향상시키기 위하여 적절한 시기의 유지관리활동이 필요하며, 이 시기를 정확히 예측하는 것은 콘크리트 구조물의 내구성 확보와 경제성 측면에서 매우 중요하다.

1) 정회원, 인천대교(주) 기술관리본부 구조물/시설팀 사원
2) 정회원, 한국시설안전공단 일반도로팀 특수교통합유지관리센터, 파트장

* Corresponding author : chung6@korea.ac.kr 032-745-8083
• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 논문에서는 한국시설안전공단의 정밀안전진단보고서 자료를 토대로 5년에 한번 씩 수행되는 정밀안전진단의 비파괴시험 결과를 모니터링 데이터로 활용하여 통계적인 방법으로 환경조건별, 도심에 위치해 있는 탄산화 속도계수와 피복두께의 통계치를 도출하였으며, 국내 교량의 탄산화 속도계수와 피복두께의 특성을 고려하여 초기설계모델 변수가 가지는 불확실성을 고려할 수 있어 지속적인 모니터링 데이터가 축적되는 실구조물의 경우 유용한 기법이라고 판단되는 베이지안 기법을 이용하여 콘크리트 구조물의 탄산화 깊이를 예측하였다. 또한 탄산화 콘크리트 구조물의 잔존수명을 예측하기 위해서 신뢰성 지수를 이용하였고, MCS(Monte Carlo Simulation)와 LHS(Latin Hypercube Sampling) 샘플링기법의 비교를 통하여 본 논문에서 수행된 LHS를 이용한 샘플링기법이 보다 효율적인 시뮬레이션 수행이 가능함을 확인하였다.

2. 확률론적 기법을 이용한 콘크리트 구조물의 탄산화 내구성 예측

2.1 콘크리트 구조물의 탄산화 속도 모델

표면으로부터 콘크리트 내부로 침투하는 CO₂의 분포를 해석하기 위해서는 다음과 같은 Fick의 두 번째 법칙을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_{co_2}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{co_2}}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, 탄산화 된 깊이 X 에 대한 함수로 적분하면 다음과 같은 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$X = \sqrt{2DC_{co_2}} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, D 는 CO₂ 확산계수(mm²/sec)이고 C_{co_2} 는 CO₂ 량이며, X 는 탄산화 깊이(mm)를 나타낸다. 대기 중의 CO₂량과 콘크리트 내의 수산화칼슘의 반응에 의해 콘크리트 표면으로부터 탄산화가 진행된다. 식 (2)에서 CO₂ 확산계수와 CO₂량에 대해서 탄산화 속도계수(A)로 간단화하면 시간에 대한 함수로 표현하면 다음 식 (3)과 같다. 탄산화 속도 모델 중에서 \sqrt{t} 법을 가장 많이 사용한다.

$$X = A \sqrt{t} \quad (3)$$

여기서, A 는 탄산화 속도계수(mm/year^{0.5})이고, t 는 콘크리트가 경과한 시간(year)을 나타내고 X 는 탄산화 깊이(mm)를 나타낸다. 탄산화 속도계수가 클수록 탄산화의 속도도 빠르게 된다.

콘크리트 구조물별로 탄산화에 따른 열화를 예측하기 위해서는 구조물의 종류와 환경조건을 반영하는 일반화된 탄산화 속도계수를 제안해야 한다. 하지만 탄산화 속도계수는 여러 요인으로 인해 불확실성을 가지게 되며 상식(3)과 같이 단순히 일반적인 함수로 규정하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 본 논문에서는 문헌조사를 통해 산출된 통계값에 의한 탄산화 속도계수를 확률분석을 이용하여 일반화된 탄산화 속도계수를 제시하였다. 또한 SPSS 확률통계분석 프로그램을 이용하여 유의수준 5%에서 Shapiro-Wilk 검정을 통하여 탄산화 속도계수의 정규성 검토를 한 결과 Table 1에 제시된 바와 같이 탄산화 속도계수의 확률분포가 정규성을 따르고 있음을 확인하였다.

2.2 탄산화 내구성 분석

2.2.1 확률론적 기법을 이용한 탄산화 예측 모델링

통계학적 확률론적 예측기법인 베이지안 기법은 고려해야 하는 확률변수에 따른 확률분포 종류에 의해서 모델이 정해진다. 베이지안 기법은 지속적인 가능한 데이터 획득으로 불확실성이 감소하고 사후에 예측되는 확률분포도 변화하게 된다. 베이지안 기법은 현장모니터링 데이터를 적용하기 전의 확률분포를 사전확률분포(prior probability distribution)로 정의하고, 현장모니터링 데이터를 적용하여 업데이트된 확률분포를 사후확률분포(posterior probability distribution)라고 정의한다. 현장모니터링 데이터는 우도함수(likelihood function)로 정의된다.

본 논문에서 베이지안 기법을 이용한 확률론적인 해석의 모델링을 정확하게 결정하기 위해서는 확률변수에 대한 충분한 데이터가 필요하고, 확률변수의 분포가 정규분포를 따른다고 했을 경우, 사전 및 사후 확률분포는 공액분포(conjugate distribution)를 만족하게 되고 정규분포를 따르게 된다. 본 연구에서 설계변수로 사용되고 있는 탄산화 속도계수는 엄밀하게 표준정규분포를 따르고 있지 않지만 SPSS 확률통계분석 프로그램을 이용하여 유의수준 5%에서 Shapiro-Wilk 검정을 통하여 탄산화 속도계수의 정규성 검토를 한 결과 Table 1과 같이 탄산화 속도계수의 확률분포가 정규성을 따르고 있음을 확인하였기 때문에 본 논문에서는 정규분포를 따른다고 가정하고 탄

산화 속도계수의 평균과 표준편차를 사용하였다. 사전확률 분포는 통계적이고 결정론적인 방법에 의해 계산되고 공 용중 콘크리트 구조물이 가지는 불확실성을 고려하기 위 해서 지속가능한 현장 모니터링 데이터인 우도함수와 사 전확률분포를 조합하여 사후확률분포를 나타내었다.

본 논문에서는 탄산화에 영향을 받는 콘크리트 구조물 의 열화를 예측하기 위해서 베이지안 기법을 적용하였고 본 기법을 적용하기 위해서 콘크리트 구조물에 대한 현장 모니터링 데이터가 필요하다. 초기 모델변수가 가지는 불 확실성으로 인한 사전확률을 $P'(\vartheta)$ 라고 하고, 계측 데이 터의 추세가 고려된 불확실성에 대한 사후확률을 $P''(\vartheta)$ 로 표현한다. 이 두 확률 사이에는 베이스 이론에 의해서 다음 식 (4)와 같은 관계가 성립한다(Ang, 1975).

$$P''(\vartheta) = c_1^* P(\underline{X} | \vartheta) P'(\vartheta) \quad (4)$$

여기서, ϑ 는 모델변수이다. 본 논문에서는 탄산화 속도 계수(A)를 모델변수로 사용하였다. c_1^* 는 전 확률 조건으 로부터 결정되는 상수이다. 우도함수인 $P(\underline{X} | \vartheta)$ 는 모델 변수 ϑ 을 가질 때 현장 모니터링 데이터 \underline{X} 가 가지는 불 확실성이다.

$$P(\vartheta) = P(\underline{X}) \quad (5)$$

염해, 압축강도, 크리프, 건조수축과 같이 단조 증가 또 는 감소하는 문제인 경우, 식 (5)가 성립하게 된다. 즉, k 번째 구간의 모델상수의 불확실성은 열화예측의 불확실 성과 같다.

2.2.2 확률적 해석 기법을 이용한 사후예측 이론

일반적으로 구조분야에서 정해를 구하기 어려운 확률 적인 문제에 대해서 확률론적 기법인 MCS 기법을 주로 사용하게 된다. 단, 방대한 데이터와 많은 시간을 가지고 있을 경우 가장 정확하게 예측을 할 수 있다. 그러나 계측 된 데이터의 수가 모자르거나 적은 시간을 가지고 구조물 에 대한 확률적인 예측을 할 때에 MCS 기법은 한계성을 가지게 된다. 따라서 MCS 기법의 대안으로 샘플링 기법 을 적용할 수 있으며, 본 논문에서는 많은 수의 파라미터 를 분석하는데 유용하며, 적은 모의실험을 수행하면서도 실험점들이 모델변수 영역에 골고루 분포되는 공간을 채 우게 되는 특성을 가지는 라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법을 이용하여 적은 현장 모니터링 데이터와 적은 시간을 활용

하여 경제적인 해석을 수행하였다. 모니터링을 통해 계측 된 시간 t_m 에서 탄산화 깊이 ($m=1, 2, 3, \dots, M$)를 X_m 이라 하면, 초기 계측치를 이용해서 개선 전, 즉 모니 터링을 통해 얻어지는 추가적인 데이터를 고려하지 않은 탄산화 깊이 X' 의 평균 $\overline{X'}$ 과 표준편차 $\sigma_m^{X'}$ 는 다음 식 (6)과 같다. 이 때, 등가의 확률을 가지는 구간을 k 개로 나누었다.

$$\overline{X'_m} = \frac{1}{K} \sum_k X_m^{(k)}, \quad \sigma_m^{X'} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (X_m^{(k)} - \overline{X'_m})^2} \quad (6)$$

여기서, $\overline{X'}$, $\sigma_m^{X'}$ 는 각각 시간 t_m 의 함수이다. 시간 t_m 에서 X_m 에 해당하는 탄산화 깊이를 계측한 후에는 우도함수 p_k 를 다음 식 (7)과 같이 구한다.

$$p_k = \exp \left[- \sum_m \frac{1}{2} \left(\frac{X_m - X_m^{(k)}}{\sigma_m^{X'}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

여기서, 우도함수의 표준편차 $\sigma_m^{X'}$ 는 기존의 실험치나 측정 데이터로부터 추정해야 한다. 모델 예측치의 평균 $\overline{X_m''}$ 는 통계적 분포를 전술한 베이지안 기법을 사용하여 다음 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\overline{X_m''} = \sum_k P''(X_m^{(k)}) X_m^{(k)} = c_o \sum_k p_k X_m^{(k)} \quad (8)$$

개선된 탄산화 깊이의 평균 예측치 $\overline{X_m''}$ 의 표준편차 $\sigma_m^{X''}$ 는 식 (9)와 같다.

$$\sigma_m^{X''} = \sqrt{c_o \sum_k p_k (X_m^{(k)} - \overline{X_m''})^2} \quad (9)$$

2.2.3 확정론적 한계상태식

콘크리트 내부로 CO₂가 침투·확산하게 되면 시간이 지 남에 따라 탄산화로 인해서 콘크리트 알칼리성이 중성이 되기 시작한다. 콘크리트가 탄산화 과정을 겪으면서 점점 탄산화 깊이가 깊어지고, 철근 깊이까지 탄산화가 진행되 게 되면 철근의 부동태 피막이 파괴된다. 이러한 피막 파 괴현상은 철근의 부식을 야기하고 구조물의 내구성능을 저하하는 요인이 된다. Fig. 1과 같은 시나리오로 콘크리 트는 탄산화에 의한 열화과정을 거치게 된다.

탄산화가 진행되어 철근 깊이까지 도달하여 철근 부식 을 유발하는 시점을 사용성 한계상태로 정의하고, 이때의

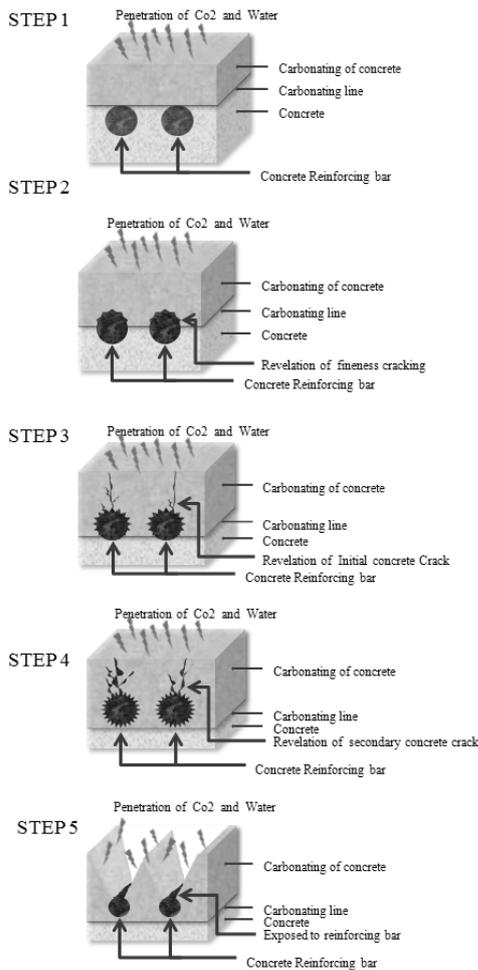


Fig. 1 Scenario of concrete corrosion according to carbonation.

부식발생 확률을 계산한다. 한계상태에 대한 부식 발생 확률을 구하기 위해 다음 식 (10)과 (11)와 같은 한계상태함수(limit state function)로 정의하였다.

$$\underline{\vartheta} = \underline{\theta} [A], R = r(\underline{\vartheta}), S = s(\underline{\vartheta}) \quad (10)$$

$$G = R - S \quad (11)$$

여기서, R 은 콘크리트 피복두께(mm), 하중함수 S 는 시간에 따라 변화하는 탄산화 깊이(mm)이며, θ 는 함수를 의미한다. 한계상태함수 G 는 손상확률 P_f 로 나타낼 수 있다. 손상확률 P_f 보다 실무에서는 신뢰성 지수 β 를 이용하여 부식발생 확률을 나타낸다. 손상확률 P_f 와 신뢰성 지수 β 는 다음 식 (13)과 같은 관계가 있다.

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg \quad (12)$$

Table 1 Carbonation velocity coefficient according to station of the bridges.

Station of bridges	The number of bridges	Mean (mm/year ^{0.5})	Standard Deviation (mm/year ^{0.5})	Normality test (shapiro-wilk)
River	1631	2.255	2.391	0.56
Land	780	2.899	2.380	0.167
Sea	95	2.761	1.920	0.121
River*	514	2.450	2.747	0.315
Land*	673	3.762	3.405	0.642
Sea*	7	5.366	2.443	0.216

* station of the bridges under urban area.

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}, P_f = \Phi(-\beta) \quad (13)$$

여기서, $f_G(g)$ 는 확률밀도함수이고, σ_G 는 G 의 표준편차이며, μ_G 는 G 의 평균이다.

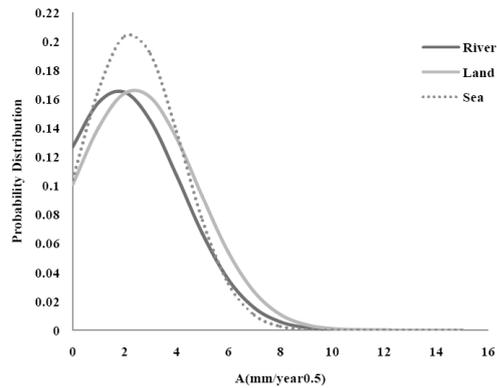
3. 대상 교량의 탄산화 속도계수 분석

3.1 대상 교량의 탄산화 깊이 측정분야

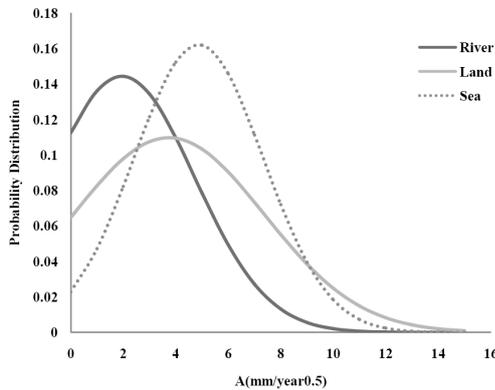
본 논문에서는 일반적으로 현장에서 간편하게 이용되는 페놀프탈레인 (페놀프탈레인은 pH 지시약의 일종으로 1% 알칼리용액)을 이용하여 콘크리트의 탄산화 진행 정도를 측정하였다. 콘크리트 구조물에서의 탄산화 시험은 구조체에서 채취한 코어 또는 구조체 안전(내하력 등)에 영향을 미치지 않는 부위를 선정 일부분을 파손하여 노출된 측정면에 최대한 신속하게 분무하여 탄산화 깊이를 측정하며, pH 8.2~10.0 이상의 알칼리측에서는 홍색으로 발색하며 중성측에서는 무색으로 나타나게 되는데, 탄산화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 깊이를 깊이계 또는 버니어캘리퍼스 등으로 측정한다.

3.2 환경 조건별 탄산화 속도계수(A)

본 장에서는 강상, 육상, 해상 등 총 3가지로 분류하여 1995년부터 2007년까지 수행한 한국시설안전공단의 교량관련 정밀안전진단보고서(한국시설안전공단, 1997~2007)를 토대로 탄산화 속도계수를 분석하였다. Table 1에는 도심에 위치한 탄산화 속도계수와 각 환경조건에 따른 탄산화 속도계수의 평균과 표준편차를 나타내고 있다. 탄산화 속도계수(A)의 확률분포는 Fig. 2와 같다. 시공조건과 현장조건에 따라 각 콘크리트 구조물의 탄산화



(a) According to station of the bridges.



(b) according to station of the bridges under urban area.

Fig. 2 Probability distribution of carbonation velocity coefficients(A)

에 미치는 영향과 각 콘크리트 재료가 가지는 저항력도 다르다. 통계분석을 하기 전에 각 콘크리트 구조물의 콘크리트 품질 수준을 검증해야 할 필요가 있다. 사전확률 분포를 결정할 때, 어느 정도의 대표값을 나타내야 하는 데 시공시 배합, 공정 등의 문제로 인해 생기는 품질 수준이 낮은 콘크리트 구조물에 대한 통계조사는 일반적인 콘크리트 구조물에 대한 탄산화 저항 특성을 반영할 수 있는 대표값으로 유의하지 않기 때문이다.

사후예측치의 불확실성을 감소하기 시키기 위해서는 유의한 모니터링 데이터 이용하여 사후예측치의 정확도를 향상시켜야 한다. 본 논문에서는 이창수 등(2004), Miguel 등(2001)에서 활용된 탄산화 속도계수에 의한 콘크리트 품질 평가 기준을 근거로 대상 콘크리트 구조물의 환경조건별 탄산화 속도계수를 활용하여 품질평가를 수행하였다. Table 2에 따르면, 조사된 환경조건별 콘크리트 구조물의 탄산화 속도계수를 콘크리트 품질로 구분할 때 보통이상의 품질이 90% 이상을 상회하는 것을 나타냈으며, Fig. 2(a), (b)를 보면, 조사된 환경조건별 콘크리트 구조물의 탄산화 속도계수가 콘크리트 품질기준의 평균범위에 포함되는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문

Table 2 Determination Standard code of carbonation velocity coefficient (Miguel, 2001).

Quality of a concrete	A	The number of structures(%)						Total
		River	Land	Sea	River*	Land*	Sea*	
poor	$A > 10$	23 (1.4)	8 (1.0)	0 (0.00)	9 (1.8)	45 (6.7)	0 (0.00)	85 (2.30)
average	$5 < A < 10$	137 (8.4)	110 (14.1)	12 (12.6)	38 (7.4)	116 (17.2)	5 (71.4)	418 (11.3)
good	$A \leq 5$	1471 (90.2)	662 (84.9)	83 (87.3)	467 (90.8)	512 (76.1)	2 (28.6)	3197 (86.4)

* station of the bridges under urban area.

에서 분석한 자료는 사전확률분포를 결정 할 수 있는 신뢰성 있는 자료로 판단 할 수 있다.

4. 탄산화 내구성 해석 시나리오

본 논문에서는 다음과 같은 절차로 내구성 해석을 수행하였고, Fig. 3과 같이 나타내었다.

- 1) 탄산화 해석 모델에 사용될 설계변수를 선정한다.
- 2) 선정된 설계변수인 콘크리트의 탄산화 속도계수의 평균과 표준편차를 구한다.
- 3) 정규분포(normal distribution)를 이용하여 각 설계변수의 누적분포함수(Cumulative Density Function : CDF)를 생성한다.
- 4) 3 단계에서 계산된 CDF와 LHS을 이용하여 설계변수의 샘플을 추출한다.
- 5) 추출된 샘플을 무작위로 배열하여 설계변수 조합을 구성한다.
- 6) 조합된 각 설계변수를 이용해서 탄산화 깊이를 계산하고 사전 예측치를 구한다.
- 7) 초기 모니터링 데이터로 초기 우도함수를 계산한다.
- 8) 초기 우도함수를 사용하여 6단계에 구한 사전 예측치를 보정한다.
- 9) 대상 교량의 콘크리트 피복두께의 평균과 표준편차를 구하여 저항치인 R 값으로 정한 후 한계상태함수를 이용하여 신뢰성 지수를 구하고 구조물의 수명을 구한다.

5. 적용예

5.1 개요

본 논문에서는 1995~2007년까지 한국시설안전공단

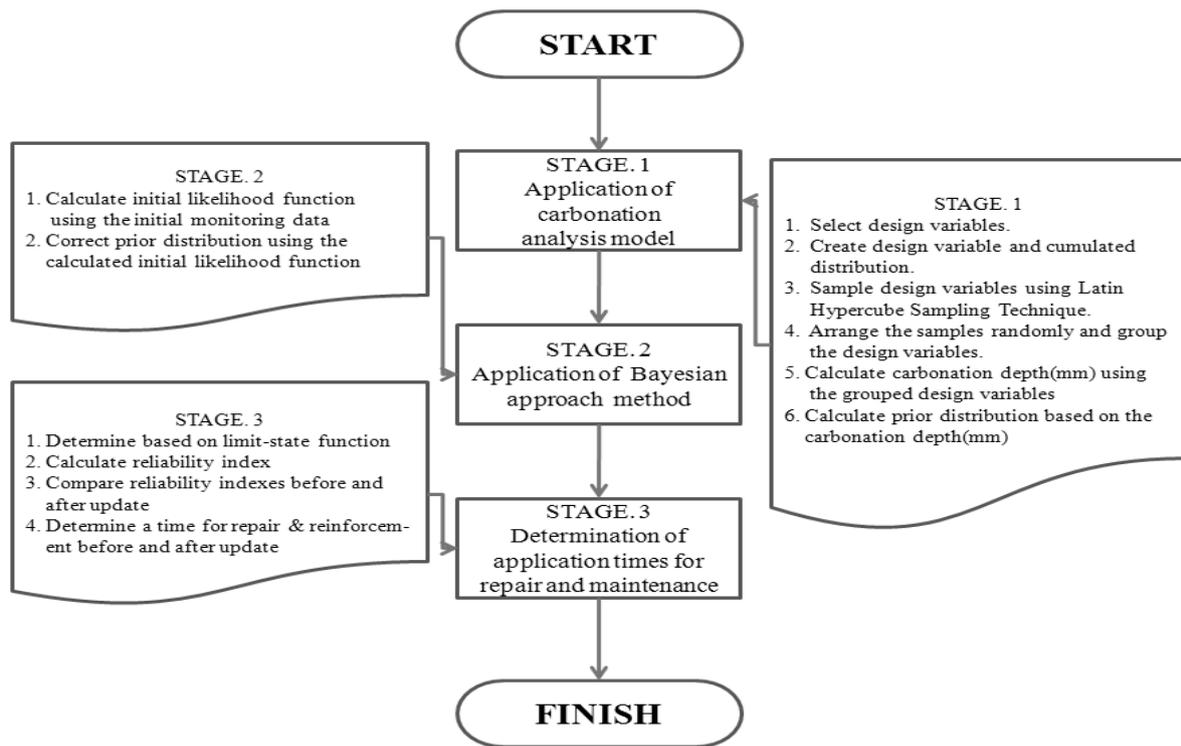


Fig. 3 Analysis procedure of the carbonation durability prediction.

Table 3 Application of monitoring data.

Name	Station of bridges	Measured point	Time (year)	Carbonation depth(mm)
Gajwa IC elevated bridge	Land	Pier	11	5
			16	5
			19	7
Jindo grand bridge	Sea	abutment	17	2
			21	10
			23	5
Noryang grand bridge	River*	Pier(old)	10	6
			17	6.5
			22	8.4
Yangpyeong bridge	Land*	Pier	5	20
			11	20.8
			15	22.8

* station of the bridges under urban area.

(한국시설안전공단, 1997~2007)의 약 2~3회 정밀안전진단을 실시한 콘크리트 구조물을 대상으로 조사하였고, 본 기법을 적용하여 각 환경조건별로 경과년수에 따른 구조물의 탄산화 깊이를 예측하였다. 정밀안전진단은 1종 시설물에 대해서 준공일 또는 사용승인일을 기준으로 10년이 지난 때부터 1년 이내에 실시하며, 진단주기는 4~6년마다 1회를 실시한다(한국시설안전공단, 2009. 3).

본 논문에서 내구성 문제의 설계변수(design parameter)

로 확률변수는 탄산화 속도계수(A)를 사용했다. 사전확률 분포를 정하기 위해서 필요한 가용 데이터가 없으므로 Table 1에서 제시 되어 있는 값을 사용하였다. Table 3은 가좌IC고가교(육상), 진도대교(해상), 노량대교(강상), 양평교(육상)를 각 환경조건별, 도심별로 분류하고, 측정위치와 구조물의 경과년도 및 탄산화 깊이를 나타내었다. Table 4는 본 연구에서 조사한 각 환경조건별, 도심별 콘크리트 구조물의 개소수와 피복두께의 평균과 표준편차를 나타내었다. 콘크리트 구조물의 신뢰성 지수를 산정하기 위해서 한계상태함수식의 저항치인 R값은 Table 4의 평균과 표준편차를 사용하였다. 여기서 Table 1과 Table 4의 현장 모니터링 데이터 개수의 차이는 보고서의 내용 중에서 기록이 되어 있지 않은 부분이거나 미측정으로 인한 부분이다.

5.2 도심별, 환경조건별 탄산화 내구성 예측

본 기법에 따른 환경조건별 탄산화 깊이를 2개의 모니터링 데이터로 사전 예측치를 보정한 사후 예측치의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

본 예제에서 다른 콘크리트 구조물의 데이터와 사전 예측치는 분명한 차이가 발생한다. 그래서 현장에서 측정된 모니터링 데이터로 2개의 현장데이터를 이용하여 사후 예측치를 계산하였다. Bazant 등(1989)에 따르면 라틴

Table 4 Statistical results of cover depth for existing bridges.

Station of bridges	The number of bridges	Mean (mm)	Standard Deviation (mm)
River	1256	57.18	34.98
Land	540	61.66	32.50
Sea	117	62.44	49.57
River*	399	57.17	33.73
Land*	541	61.27	33.08
Sea*	7	63.71	32.13

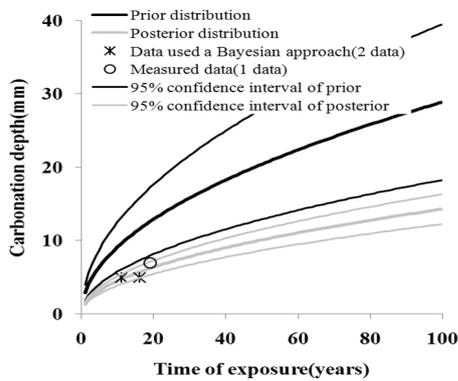
* station of the bridges under urban area.

하이퍼큐브 샘플 수는 설계변수의 수 n 을 두 배 고려한 값이 전체의 설계변수의 수에 대한 결과에 수렴되는 것을 확인하였다. 정현준 등(2008)에서는 계산량의 증가가 크지 않을 경우 $3n$ 으로 했을 때 전체 설계변수의 수와 같이 수렴되었으므로 본 논문에서는 설계변수가 1개이기 때문에 3개의 샘플 수를 사용해도 무방하지만 사후예측치의 엄밀성을 나타내기 위해 라틴 하이퍼큐브 샘플 수를 9개 세트로 고정하였다. 라틴 하이퍼큐브 샘플 수는 선행연구(정현준 등, 2008)를 참고하여 샘플 수를 늘리면 사전 예측치와 사후 예측치의 분산도분포가 좁혀진다. Fig.

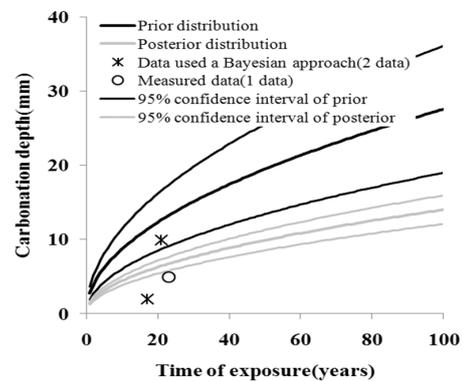
Table 5 Durability by target service life of the domestic concrete structures (KCI, 2004)

Durability	Description	Target service life
1st level	Structure that requires an extremely high level of durability	100 years
2nd level	Structure that requires a high level of durability	65 years
3rd level	Structure that requires a low level of durability	30 years

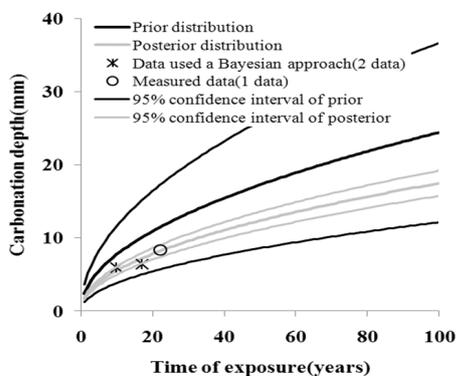
4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 육상에 위치한 가좌IC고가교의 교각과 해상에 위치한 진도대교 교대의 탄산화 깊이를 모니터링 데이터로 사전 예측치를 보정하여 예측한 결과이고, Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 도시에 위치한 각각 강상의 노량대교(구교)의 교각과 육상의 양평교 교각의 탄산화 깊이를 현장 모니터링 데이터로 사전 예측치를 보정하여 예측한 결과이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)는 그래프가 사전 예측치에 비해서 보정된 사후 예측치의 불확실성이 감소하고, 현장 모니터링 데이터가 시간에 따른 유사한 경향을 가지는 Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)는 신뢰성 구간에 포함한다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)는 Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)



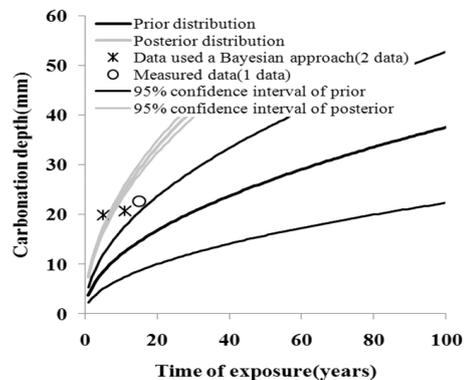
(a) Gajwa IC Elevated Bridge(Land)



(b) Jindo Grand Bridge(Sea)



(c) Noryang Grand Bridge(River)



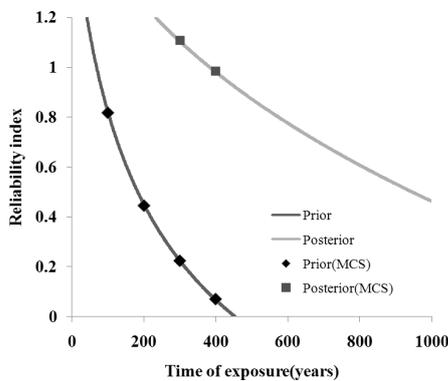
(d) Yangpyeong Bridge(Land)

Fig. 4 Prior and posterior predictions of carbonation depth according to time of exposure concrete

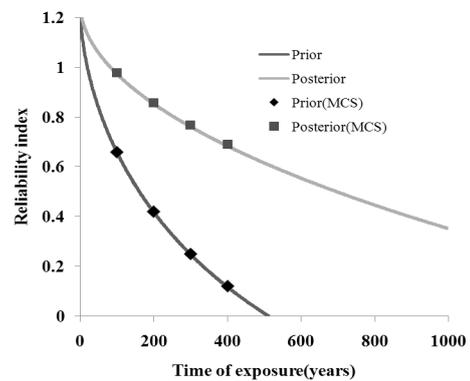
와 마찬가지로 불확실성이 감소하고 현장 모니터링 데이터가 시간에 따른 유사한 경향을 가지지 못한 Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)는 신뢰성 구간에 포함하지 못하고 접근한다. 본 논문에서 베이지안 기법이 가지는 한계성은 현장 모니터링 데이터의 신뢰성 있는 유의한 자료를 적용해야 정확한 사후 예측이 가능하다. 현장 모니터링 데이터의 신뢰성이 떨어진다면 샘플 수를 증가시켜서 다소 정밀성이 떨어지더라도 신뢰성 구간 폭을 확장하여 정확성을 기할 필요가 있다. 본 논문에서 한계값의 설정과 유의한 현장 모니터링 제어기법은 본 논문의 연구범위를 벗어나 있으므로 이러한 점은 향후 연구되어야 할 부분이다.

도심별, 환경조건별 각 콘크리트 구조물의 계층 지점에 대한 경과연수에 따른 탄산화 신뢰성 지수에 대한 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 그래프에 적용한 피복두께는 Table 4를 이용하였고 신뢰성 지수가 0이였을 경우 피복두께와 탄산화 깊이가 같아져서 콘크리트 열화과정을 겪게 된다. 일반적으로 확률적 기법으로 MCS를 이용한다. 본 논문에서 적용한 기법인 LHS의 효율적인 확률론적 시뮬레이션을 검증하기 위해서 MCS와 LHS를 비교하였다. MCS의 샘플수를 50000번 했을 때의 시뮬레이션 결과와 LHS의 샘플

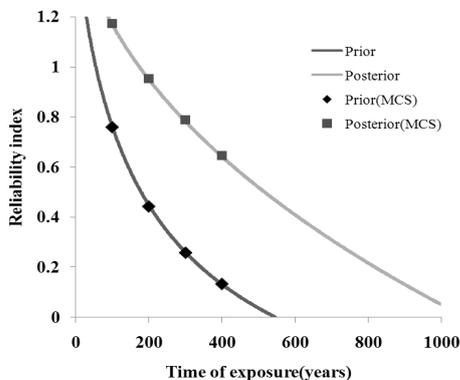
수 K를 9로 했을 때의 시뮬레이션 결과를 비교하면 약 0.1~5.66% 범위의 오차를 보인다. 두 확률적 기법에 대한 오차의 범위가 작기 때문에 많은 샘플 수를 이용하는 MCS보다는 적은 샘플수를 이용하는 LHS의 시뮬레이션이 보다 효율적인 수행으로 사료되고 본 논문에서는 LHS를 이용하여 사후예측치를 수행하였다. Fig. 5을 보면, 양평교를 제외한다면 교량의 사후예측치는 사전 예측치보다 콘크리트 열화시기가 늦기 때문에 의사결정자는 구조물에 대한 개보수시기를 늦춰서 개보수시기를 결정할 수 있고 양평교는 사후예측치가 사전예측치보다 빠른 시기로 예측되었기 때문에 구조물에 대한 개보수시기를 빠른 시기에 해야 함을 알 수 있다. 따라서 의사결정자는 Fig. 5과 같은 신뢰성 지수 그래프에 나타난 사전 및 사후 예측치의 차이를 보고 의사결정할 수 있다. Table 5와 같이 전체적으로 탄산화에 대한 노출로 인해 열화가 진행됨에도 불구하고 내구등급이 1등급 이상이므로 내구성에 따른 유지보수의 필요 없는 것으로 보인다. 그러나 일반적으로 열화가 발생하는 콘크리트 구조물은 복합적인 요인으로 인해 열화가 가속화되기 때문에 다른 요인과 함께 예측하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 특히, 양평교는 탄산화 영향에 대한 각별한 주의가 필요하다.



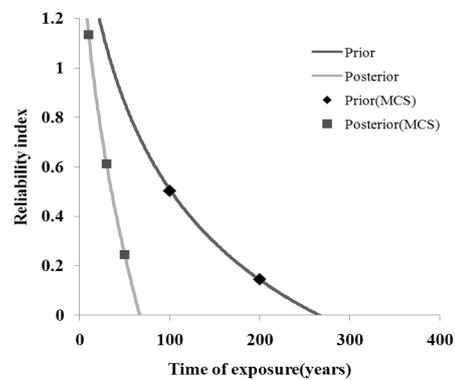
(a) Gajwa IC Elevated Bridge(Land)



(b) Jindo Grand Bridge(Sea)



(c) Noryang Grand Bridge(River)



(d) Yangpyeong Bridge(Land)

Fig. 5 Prior and posterior predictions of reliability index for limit state function

6. 결론

본 논문에서는 탄산화 영향을 받는 국내 콘크리트 구조물을 통계 분석 및 조사하여 장기 내구성 예측의 불확실성을 감소시키고 더욱 정밀하고 합리적으로 예측하기 위해서 현장 모니터링 데이터를 이용하였다. 통계 방법인 베이저안 기법과 확률론적 해석 기법인 라틴 하이퍼큐브 샘플링 기법을 조합하여 탄산화에 노출된 콘크리트 구조물의 내구적 사용수명을 예측함으로써 탄산화된 콘크리트 구조물의 유지·관리를 하기 위한 탄산화 콘크리트 구조물의 보다 정확하게 탄산화 깊이를 예측하고 신뢰성 지수를 이용하여 잔존수명을 예측한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 사전 예측치는 국내 콘크리트 구조물의 3700개 시편을 환경별, 위치별로 조사하여 탄산화에 노출된 콘크리트의 통계분석자료를 통하여 불확실성을 고려하였다. 우도함수는 현장 모니터링 데이터를 이용하였고 사후 예측치는 사전 예측치와 우도함수를 조합하여 장기 내구성을 예측하였다. 또한 내구성 예측의 95% 신뢰성 구간은 사후예측치와 동시에 자동적으로 제시되도록 하였다.
- 2) 수행한 LHS를 이용한 샘플링기법이 보다 효율적인 시뮬레이션 수행이 가능함을 확인하기 위해서 MCS와 LHS 기법의 비교했을 때 두 샘플링의 오차가 약 0.1~5.66% 범위를 보였다. 두 확률적 기법에 대한 오차의 범위가 작기 때문에 많은 샘플 수를 이용하는 MCS보다는 적은 샘플수를 이용하는 LHS의 시뮬레이션이 보다 효율적인 샘플링 기법임을 확인하였다.
- 3) 본 논문에서 제시한 기법을 수행하여 콘크리트 구조물의 장기 내구성을 예측한 결과, 우도함수로 사용되는 현장 모니터링 데이터가 시간에 따른 유사한

경향을 가지게 되면 업데이트 된 사후 예측치는 신뢰성 구간에 포함되며 더욱 정확한 예측치를 가지는 것으로 확인 되었다. 사후 예측치의 95% 신뢰성 구간은 사전 예측치보다 현저하게 좁은 구간을 나타내었기 때문에 업데이트 된 후에 더욱 엄밀한 예측을 수행하는 것을 볼 수 있었다. 또한 신뢰성 지수를 통해 의사결정자로 하여금 적절한 개보수시기를 결정할 수 있게 하였다.

참고문헌

1. 기상청 “지구대기감시 보고서 2006 - 온실가스 및 반응 가스,” 2006, pp.17-20.
2. 이창수, 윤인석, 김용혁 “서울시내 콘크리트 구조물의 중성화 진행 속도의 확률분석,” 서울도시연구논문집, Vol.5, No.1, 2004, pp.95-104.
3. 정현준, 지광습, 공정식, 강진구 “베이저안 기법을 이용한 열해 콘크리트구조물의 내구성 예측,” 한국콘크리트 학회 논문집, Vol.20, No.1, 2008, pp.77-88.
4. 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2004.
5. 한국시설안전공단, 정밀안전진단보고서, 1995-2007.
6. 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침-교량편, 2009.3.
7. Ang, A. H. -S., and Tang, W. H., “Probability concepts in engineering planning and design”, Basic principles. John Wiley and Sons, Vol.1, 1975, pp.329-359.
8. Bazant, Z. P. and Kim, J. K., “Segmental Box Girder - Deflection Probability and Bayesian Updating”, Journal of Structural Engineering, Vol.115, No.10, 1989, pp.2528-2547.
9. Miguel, A. S., Casr, D. O., “Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating, Building and Environment”, Vol.36, 2001. pp.949-953.
10. WMO, “Greenhouse gas bulletin - the state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2005”, 2006. No.2:1

(접수일자 : 2010년 3월 11일)
(심사완료일자 : 2010년 5월 20일)

요 지

본 논문에서는 탄산화 콘크리트 구조물의 내구성을 예측하기 위한 새로운 접근 방법을 제시하였다. 제시된 예측 방법은, 새로운 예측 데이터가 있을 때 베이스 이론에 근거하여 지속적인 업데이트가 가능하며 모델 매개변수의 확률론적인 특성이 고려된다. 탄산화 내구성 해석 모델의 절차는 라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법(LHS)으로 간단하게 정리되고, 이를 통해 얻는 표본으로 결정된다. 이 방법은 콘크리트 구조물의 설계에 유용하게 사용될 수 있으며, 모니터링을 통한 콘크리트 구조물의 잔존수명을 예측할 수 있다. 본 논문에서 사전예측치는 탄산화에 노출된 국내 콘크리트 구조물 데이터(3700개 시편)를 이용하여 콘크리트 탄산계수의 확률 특성을 고려하여 나타내었으며, 우도함수는 현장 모니터링 데이터를 이용하였으며 사후예측치는 사전예측치와 우도함수를 조합하여 나타내었다. 또한, 몬테 카를로 시뮬레이션(MCS)과 LHS의 비교를 통하여 본 논문에서 수행된 LHS를 이용한 샘플링기법이 보다 효율적인 시뮬레이션 수행이 가능함을 확인하였다.

핵심 용어 : 내구성 예측, 탄산화, 베이스 이론, 라틴 하이퍼큐브 샘플링 기법, 잔존수명